

Tartu Ülikool

LOODUS- JA TEHNOLOOGIA TEADUSKOND

ÖKOLOOGIA JA MAATEADUSTE INSTITUUT

GEOGRAAFIA OSAKOND

Bakalaureusetöö keskkonnatehnoloogia erialal

Loodete-tüüpi tehismärgalade tõhususe võrdlus tavapäraste tehismärgaladega

Kadri Väär

Juhendaja: PhD Alar Noorvee

Tartu 2014

Sisukord

LÜHENDID	4
SISSEJUHATUS	5
1. Avaveeline tehismärgala	7
1.1. Avaveelise tehismärgala üldine kirjeldus	7
1.2. Taimestik avaveelises tehismärgalas	7
1.3. Avaveeliste tehismärgalade kasutusala.....	9
1.4. Protsessid avaveelises tehismärgalas.....	9
1.5. Avaveeliste tehismärgaladega seotud probleemid	10
2. Pinnasfiltersüsteemid	11
2.1. Horisontaalse läbivooluga pinnasfilter süsteemid	11
2.1.1. Horisontaalse läbivooluga pinnasfiltri üldine kirjeldus.....	11
2.1.2. Horisontaalse läbivooluga pinnasfiltri kasutusala	13
2.1.3. Horisontaalse läbivooluga pinnasfiltris toimuvad protsessid.....	13
2.1.4. Horisontaalse läbivooluga pinnasfiltri opereerimine ja kulud.....	13
2.2. Vertikaalse läbivooluga pinnasfilter süsteemid	14
2.2.1. Vertikaalse läbivooluga pinnasfiltri üldine kirjeldus.....	14
2.2.2. Vertikaalse läbivooluga pinnasfiltri kasutusala	16
2.2.3. Vertikaalse läbivooluga pinnasfiltris toimuvad protsessid.....	16
3. Annus-tüüpi tehismärgala	17
3.1 Annus-tüüpi tehismärgala kirjeldus	17
3.2 Ilmatsalu annus-tüüpi tehismärgala	17
4. Loodete-tüüpi tehismärgala	20
4.1. Üldine loodete-tüüpi tehismärgala kirjeldus	20
4.2. Protsessid loodete-tüüpi tehismärgalasüsteemides.....	23
4.3. Loodete-tüüpi tehismärgalasüsteemi energiakulu	23

4.4. Temperatuuri mõju loodete-tüüpi tehis märgalasüsteemile	24
5. Protsessid tehis märgalades	25
5.1. Lämmastik	25
5.2. Fosfor	28
6. Parameetrite võrdlus	29
7. Arutelu	33
KOKKUVÕTE	35
TÄNUAVALDUSED	36
SUMMARY	40
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	42

LÜHENDID

ANAMMOX	<i>Anaerobic ammonia oxidation</i> , anaeroobne ammoniaagi oksüdatsioon
BHT ₅	Biokeemiline hapnikutarve (5 päeva vältel tarvitav hapniku kogus)
BHT ₇	Biokeemiline hapnikutarve (7 päeva vältel tarvitav hapniku kogus)
IE	Inimekvivalent
FWS	<i>Free water surface constructed wetland</i> , avaveeline tehismärgala
HSSF	<i>Horizontal subsurface flow constructed wetland</i> , horisontaalse läbivooluga tehismärgala
Hallvesi	Majapidamisreovesi (sh pesu-, kümblus- ja köögireovesi) ilma WC-st pärit reoveeta
KHT	Keemiline hapnikutarve
KHT _{Cr}	Dikromaatne keemiline hapnikutarve
N	Lämmastik
NH ⁴⁺	Ammooniumioon
NO ₂ -N	Nitritlämmastik
NO ₃ ⁻ -N	Nitraatlämmastik
N _{üld}	Üldlämmastik
P	Fosfor
P _{üld}	Üldfosfor
TFCW	<i>Tidal flow constructed wetland</i> , loodete-tüüpi tehismärgala
TSS	Heljuvaine (heljum)
VSSF	<i>Vertical subsurface flow constructed wetland</i> , vertikaalse läbivooluga tehismärgala

SISSEJUHATUS

Järjest enam püütakse leida keskkonnasäästlikumaid, odavamaid ja tõhusamaid viise reoveepuhastamiseks. Selle tõttu on tõusnud ka huvi tehismärgalasüsteemide kasutamise vastu. Tehismärgalasüsteemide näol on tegemist suhteliselt odava reoveepuhastustehnoloogiaga, mis võimaldab reovett puhastada madalate energia- ja hoolduskuludega. Tehismärgalasid kasutatakse nii olmereovee, tööstusliku reovee kui ka hallvee puhastamiseks. Orgaanilise materjali ja lämmastiku eemaldamine reoveest on suures sõltuvuses lahustunud hapniku kogusest tehismärgala süsteemis. Seega on väga tähtis arendada meetodeid, mis parandavad hapniku kättesaadavust tehismärgalas. Hapnikuvarustuse parandamiseks on kasutatud mitmeid meetodeid, näiteks vertikaalse läbivooluga pinnasfiltrite kasutamine, heitvee tagasipumpamise (ringluse) rakendamine, muutuva veetasemega süsteemide ja ka annus- ning loodete-tüüpi süsteemide kasutamine (Karabelnik, 2012).

On kolm peamist tehismärgala tüüpi: avaveelised tehismärgalad (FWS), horisontaalse läbivooluga tehismärgalad (HSSF) ja vertikaalse läbivooluga tehismärgalad (VSSF). Enimlevinud neist on avaveelised ja horisontaalse läbivooluga tehismärgalad (Kadlec, 2008). Nendele tehismärgaladele lisanduvad veel kombineeritud pinnasfiltersüsteemid ja tehismärgalapuhastid. Kombineeritud süsteemid kujutavad endast erinevate tehismärgalasüsteemi tüüpide kombinatsiooni. Kõige sagedasemalt kasutatakse horisontaalse ja vertikaalse läbivooluga tehismärgalade (pinnasfiltrite) kombinatsiooni (Vymazal, 2008b).

Käesolevas töös käsitletakse avaveelisi, horisontaalse läbivooluga, vertikaalse läbivooluga, loodete-tüüpi ning annus-tüüpi tehismärgala süsteeme. Vertikaalse läbivooluga tehismärgalas pumbatakse vesi filterkehale, vesi voolab vertikaalselt läbi filterkeha ja kogutakse kokku drenaaži süsteemi poolt ning heitvesi voolab edasi järgmisesse staadiumisse (Karabelnik, 2012). Efektiivne aeratsioon saavutatakse väljavoolava vee poolt tekitatud alarõhu tõttu. Õhu kaasatõmme on võrdeline väljavoolava vee mahuga. Horisontaalse läbivooluga pinnasfiltrites toimub aeratsioon otsese difusiooni käigus atmosfääri ja pinnase vahelisel piirpinnal või taimede poolse hapnikueralduse käigus. Kuid sellise aeratsiooni käigus ei saa tehismärgala piisavalt hapniku ning selle tõttu on horisontaalse läbivooluga tehismärgalas väga suure tähtsusega anaeroobsed protsessid (Noorvee *et al.*, 2007). Horisontaalse läbivooluga

pinnasfiltrites piirduvad aeroobsed tsoonid pinnase ülemise kihiga ning taimejuurte ümbrusega. Seega on aeroobsed puhastusprotsessid HSSF märgalades vähem efektiivsed.

Selleks, et puhastusprotsess oleks efektiivsem, ongi välja töötatud loodete-tüüpi tehismärgala süsteemid, kus reovett pumbatakse mehaaniliselt filterkehale ning seeläbi vahelduvad päevas mitu korda filterkeha üleujutuse ja kuivenduse tsüklid. Sellise puhastusmeetodi kasutamiseks on aga vaja kasutada energiat.

Energiakulu alusel saab jaotada tehismärgalad A ja B tüüpi märgaladeks. A tüüpi märgalad kujutavad endast kõige looduslähedasemaid tehismärgalasid, mille opereerimiseks kulub vähe energiat ja nende toimimiseks piisab vähestest konstruktsioonidest. B tüüpi tehismärgalade opereerimiseks kulub aga rohkem ressursse ja energiat. B tüüpi tehismärgalad on keerukama struktuuriga, nende juures võidakse kasutada mehaanilist aereerimist ning erinevaid pumpasid (Kadlec, 2009).

Võrreldes tavapäraste tehismärgala tüüpidega toimivad loodete-tüüpi tehismärgalas efektiivselt nii aeroobsed kui ka anaeroobsed protsessid ning puhastusprotsessi hapnikuga varustatus on suurem. Seega on loodete-tüüpi tehismärgala puhastusefektiivsus suurem võrreldes VSSF ja HSSF tüüpi märgaladega.

Käesoleva referatiivse bakalaureusetöö käigus võrreldakse loodete-tüüpi tehismärgalade ehituslikke ja tehnoloogilisi eripärasid teiste peamiste tehismärgalade tüüpidega. Bakalaureusetöö peamiseks eesmärgiks on kirjeldada loodete-tüüpi tehismärgalasüsteeme, tuua välja nimetatud tehismärgalasüsteemide tugevad ja nõrgad küljed ning võrrelda neid teiste tehismärgalatüüpidega.

1. Avaveeline tehismärgala

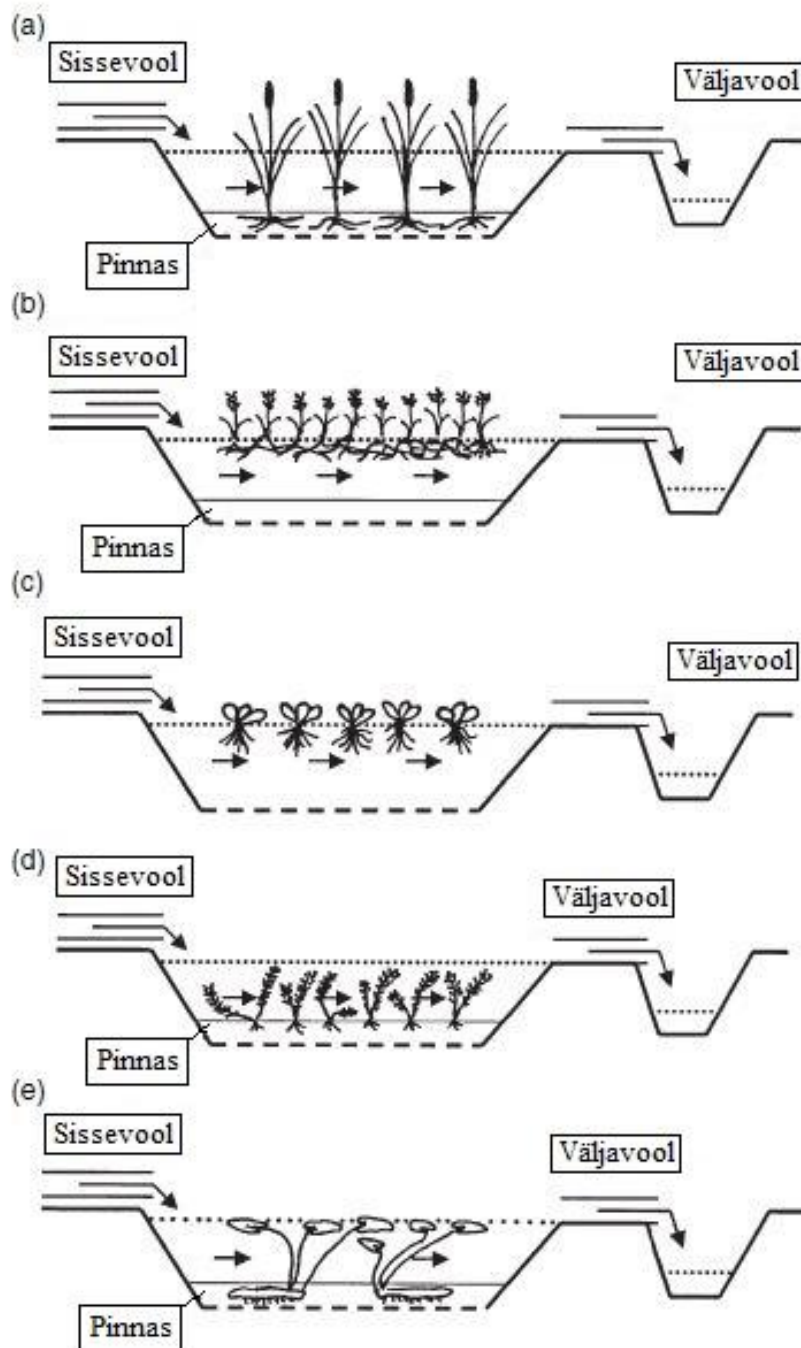
1.1. Avaveelise tehismärgala üldine kirjeldus

Avaveelised tehismärgala süsteemid (FWS) on osaliselt kaetud taimestikuga ning märgala pinda katab avatud vee kiht, mille paksus on umbes 0,1-0,6 meetrit (El-Sheikh *et al.*, 2010) ning külgede soovituslik pikkuse ja laiuse suhe on 10:1 (Noorvee *et al.*, 2007). Võrreldes pinnasfilter-tehismärgaladega on avaveelised tehismärgalad välimuse poolest tunduvalt looduslähedasemad. Avaveelised märgalad koosnevad enamasti paralleelselt paiknevatest madalatest tiikidest või kanalitest, mis on vett mitteläbilaskva põhjaga. Aluspinna võib vettpidavaks muuta kasutades tehislisku geomembraani, kuid praktikas kasutatakse seda harva, enamasti valitakse märgala aukohaks looduslikult vettpidava pinnasega piirkond (Noorvee *et al.*, 2007). Märgala vett mitteläbilaskev põhi on kaetud 20-30 cm mulla või kruusa kihiga, kuhu saab kinnitada märgala taimestik. Et märgalas oleks võimalik vajaduse korral teostada hooldustöid, on oluline, et FWS koosneks vähemalt kahest paralleelselt asuvast tiigist, seega on vajaduse korral võimalik sulgeda peavool ühes tiigis (Noorvee *et al.*, 2007). Soovituslik orgaaniline reostuskoormus on väiksem kui 120 kg BHT ha⁻¹ ööp⁻¹ (Noorvee *et al.*, 2007). Samuti on FWS süsteem üks odavamaid tehismärgala süsteeme, kuid töös olevale süsteemile võivad lisanduda erinevad opereerimiskulud: näiteks taimede eemaldamine ja talvised lisakulud külmumise ärahoidmiseks, mis lõppkokkuvõttes võivad tehismärgala hinda tõsta (Kadlec, 2009).

1.2. Taimestik avaveelises tehismärgalas

Avaveelistes märgalades kasutatakse paljusid erinevaid taimeliike. Eri tüüpi taimede põhjal saab liigitada avaveelised tehismärgala süsteemid kolme peamisesse rühma: veepinnal ujuvate makrofüütidega süsteemid, veealuste makrofüütidega süsteemid ja põhjajuurduvate makrofüütidega süsteemid (Joonis 1) (El-Sheikh *et al.*, 2010). Peamised taime liigid, mida veepinnal ujuvate makrofüütidega süsteemides kasutatakse on vesi hüatsint (*Eichhornia crassipes*), vesisalat (*Pistia stratiotes*), lemlelised (*Lemnaceae spp.*), vesiroosilised (*Nymphaea spp.*) ja kollane vesikupp (*Nuphar lutea*) (Vymazal, 2008a). Veepinnal ujuvate makrofüütidega süsteemis võib eristada veel ka ujulehtedega ja vabalt ujuvaid taimi, mis võivad moodustada ujuvaid matte (Vymazal, 2008a). Veealuste makrofüütidega süsteemides kasutatakse näiteks kamm-penikeelt (*potamogeton pectinatus*) ja hiina alssi (*eleocharis dulcis*) (Vymazal, 2008a). Veealuste makrofüütidega süsteemide puhul on tähtis, et vee

hapniku sisaldus oleks piisavalt kõrge, et taimed saaksid kasvada, seega ei tohiks puhastatav reovesi sisaldada suurtes kogustes bioloogiliselt lagunevat orgaanilist materjali, vastasel juhul võib veekeskkond muutuda anoksiliseks (Vymazal, 2008). Põhja juurduvate taimedega süsteemides kasutatakse näiteks hundinuia (*Typha*), harilikku pilliroogu (*Phragmites australis*) ja kõrkjaid (*Scirpus spp.*) (Vymazal, 2008a).



Joonis 1. Erinevat tüüpi avaveelised tehismärgalad. (a) Põhja juurduvate ja pinnale ulatuvad makrofüüdid; (b) veepinnal ujuvad makrofüüdid, taimed moodustavad ujuvaid matte; (c) veepinnal ujuvad makrofüüdid; (d) veealused makrofüüdid; (e) ujuvate lehtedega makrofüüdid (Vymazal, 2001).

Selleks, et taimedes akumulunud toitained süsteemist välja viia, tuleb nad eemaldada näiteks niitmise teel (Noorvee *et al.*, 2007). Taimede niitmist tuleks teha regulaarselt, vastasel juhul võivad taimedesse kogunenud toitained peale taimede lagunemist sattuda tagasi veekeskkonda.

1.3. Avaveeliste tehismärgalade kasutusala

Avaveelised tehismärgalad on enamasti kasutusel teise või kolmanda astme reovee järelpuhastamisel. Seega kasutatakse seda tüüpi märgalasid abistava süsteemina teiste reovee puhastusmeetodite kõrval, kuid need sobivad ka lokaalseks reovee puhastusmeetodiks, väikeste reovee koormuste puhul. Avaveelisi tehismärgalasid kasutatakse näiteks olmereovee, kaevanduse nõrgvee, linna ja põllumajandusliku äravoolu (hajureostuse) ning prügila nõrgvee puhastamiseks (J. Vymazal, 2008).

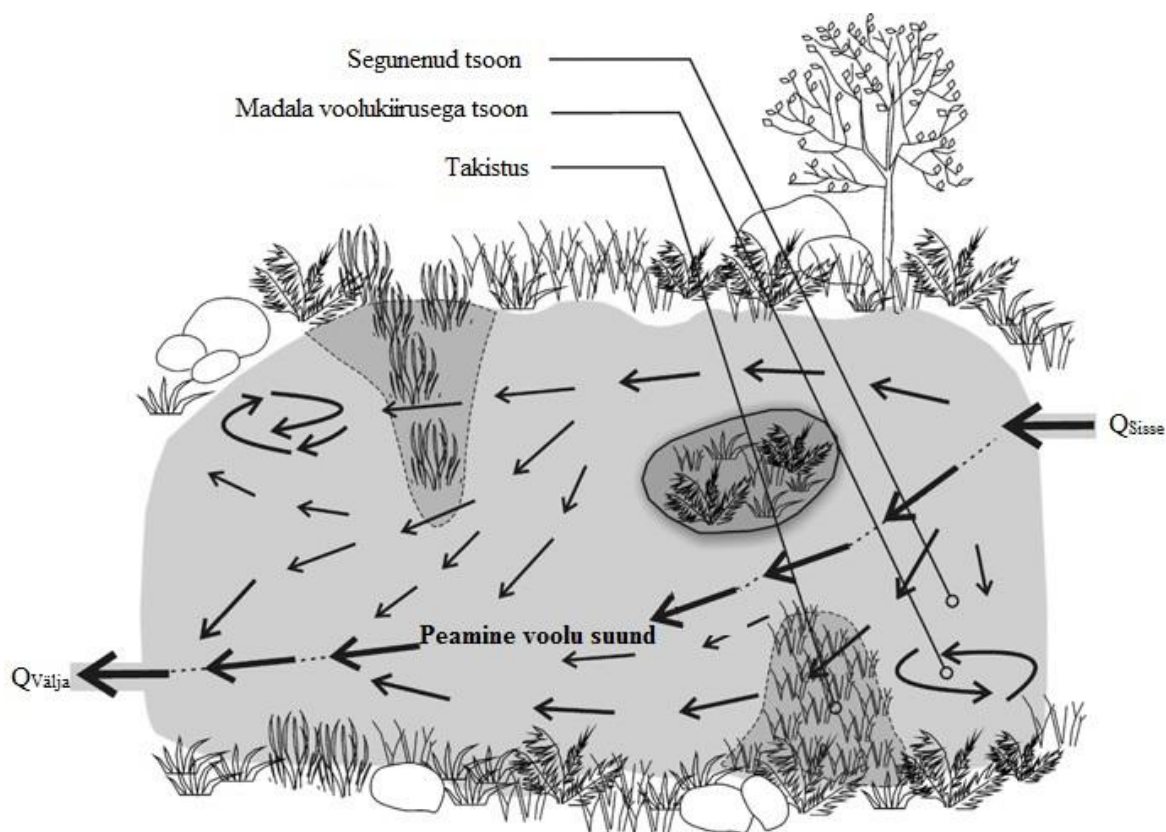
Avaveelisi tehismärgalasid on kasutatud ka toitainete eemaldamiseks reostunud veekogudes, et tagada sealse ökosüsteemi jätkusuutlik toimimine (Kadlec *et al.*, 2010; Martin *et al.*, 2013). Valencias Hispaanias on kasutatatud avaveelist tehismärgala Albuferia järve eutrofeerunud vee seisundi parandamiseks. Eesmärgiks oli vähendada toitainete kogust ja fütoplanktoni populatsiooni ning välja selgitada märgala ehituslikud parameetrid, et saavutada maksimaalne puhastusefektiivsus täismõõduliste süsteemide puhul. Kaheaastase perioodi järel tehti saadud tulemuste põhjal kokkuvõtte ning tehismärgala puhastusefektiivsus oli heljumi, üldfosfori, üldlämmastiku, lahustunud anorgaanilise lämmastiku ja NO_3^- -N näitajaid arvesse võttes 35%, vaatamata sellele, et taimestik polnud veel täielikult välja kujunenud. (Martin *et al.*, 2013)

1.4. Protsessid avaveelises tehismärgalas

Saasteainete eemaldamine FWS tehismärgalas toimub mitmete keemiliste, füüsikaliste ja bioloogiliste protsesside tulemusel. Peamised protsessid, mis seda tüüpi märgalas toimuvad, on settimine, sadenemine, adsorptsioon mullaosakestele, assimileerumine taimekudedes ja aine koostise muutumine mikroobide elutegevuse tagajärjel (Vymazal, 2008). Suurt tähelepanu pööratakse orgaanilise aine, toitainete ja heljumi eemaldamisele. Orgaanilise aine ja heljumi eemaldamine avaveelises märgalas on tõhus, samas kui toitainete (lämmastik ja fosfor) eemaldamise efektiivsus on vaid mõõdukas.

FWS tehismärgalas on esindatud nii aeroobsed kui anaeroobsed tsoonid. Hapnik satub vette difusiooni teel läbi avatud veepinna ja fotosünteesi käigus (Noorvee *et al.*, 2007). Seega märgala tiikide sügavamates osades domineerivad anaeroobsed mikroobsed protsessid ning

pindmistes kihtides domineerivad aeroobsed mikroobsed protsessid (Vymazal, 2008). Samuti on hapniku allikaks ka taimede juured, kuna enamustel märgala taimedel on välja kujunenud mehhanismid, et vältida juuresooni anoksiat (Noorvee *et al.*, 2007; El-Sheikh *et al.*, 2010). Selleks, et tagada märgalas toimuvate protsesside efektiivne toimimine, on väga oluline, et oleks tagatud vee ühtlane jaotumine ja vool (Joonis 2). Hüdrauliline viibeaeg on üks näitaja, mis seda kirjeldab. Hüdrauliline viibeaeg näitab kui kaua on sissevoolanud reovesi viibinud märgala tiikides. Hüdrauliline viibeaeg on tähtis märgala parameeter, kuna kirjeldab, saasteainete eemaldamise aktiivset aega (Su *et al.*, 2009). Reovee soovituslik viibeaeg avaveelises tehismärgalas on >15 ööpäeva (Noorvee *et al.*, 2007).



Joonis 2. Skeem FWS märgala vee voolust, kus Q_{sisse} on sissevool märgalasse ja $Q_{\text{välja}}$ on väljavool märgalast. (Su *et al.*, 2009)

1.5. Avaveeliste tehismärgaladega seotud probleemid

FWS tehismärgala kujutab endast avatud veega süsteemi, seega on suur oht, et loomad või inimesed võivad kokku puutuda märgala reoveega ja selles sisalduvate patogeenidega (Kadlec, 2009). Samuti on avaveelised tehismärgalad ohtlikud sääskedega levivate haiguste aspektist (Noorvee *et al.*, 2007). Sellest tulenevalt ei oleks abi ka märgalale juurepääsu piiramisest.

Paljusid biokeemilisi protsesse määrgalas mõjutab temperatuur, seega määrgala puhastusefektiivsus on sellest otseselt sõltuvuses. Mikroobsete protsesside maksimaalne aktiivsus esineb vaid sellele protsessile omases optimaalses vahemikus (Kadlec & Reddy, 2001). Sellest tulenevalt langeb avaveelise tehismäärgala puhastusefektiivsus madalamatel või kõrgematel temperatuuridel. Eriti suur on probleem seoses tehismäärgala puhastusefektiivsuse langusega külmema kliimaga maades, kus temperatuurid langevad alla 0 kraadi Celsiust. FWS tehismäärgala puhul on tähtis, et määrgala tiik ei külmuks põhjani, kuna siis määrgalas toimuvad protsessid peatuvad (Kadlec, 2009).

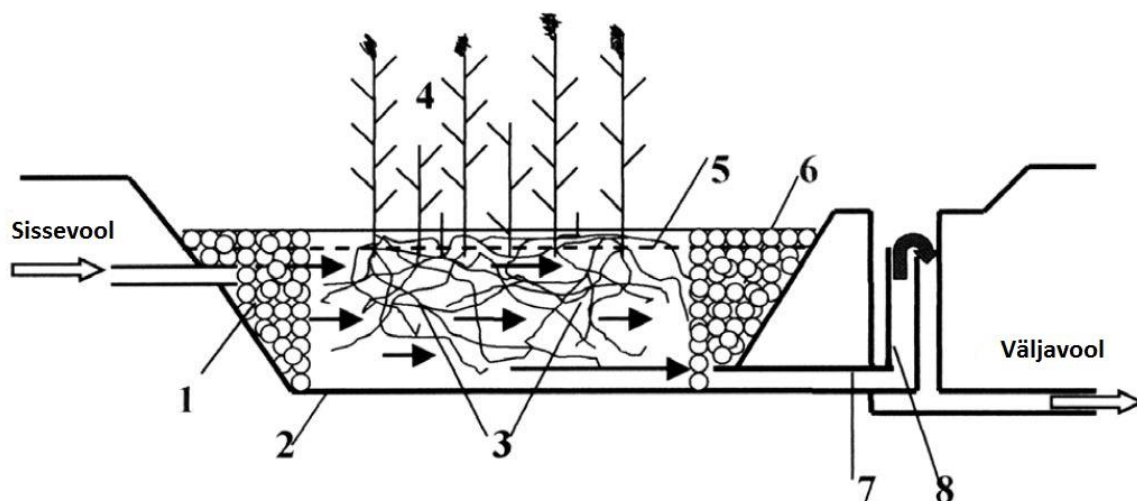
2. Pinnasfiltersüsteemid

Pinnasfiltrid on reovee puhastussüsteemid, mis koosnevad erineva tera suurusega filtermaterjalist ja selle peal kasvavast taimestikust. Pinnasfiltri peamised tüübid on vertikaalse läbivooluga ja horisontaalse läbivooluga tehismäärgala süsteemid. Pinnasfiltrite alla kuuluvad ka hübriidsed süsteemid, mis enamasti on kombinatsioon HSSF ja VSSF tehismäärgala süsteemidest. Pinnasfiltrite puhul on tähtis enne reovee suunamist filterkehale see eeltöödelda ning eemaldada sellest heljum, mis võib hiljem ummistada filtri (Vymazal, 2008). Eeltöötleses kasutatakse erinevaid võresid ja septikuid.

2.1. Horisontaalse läbivooluga pinnasfiltersüsteemid

2.1.1. Horisontaalse läbivooluga pinnasfiltri üldine kirjeldus

Horisontaalse läbivooluga (HSSF) pinnasfiltersüsteemi puhul on tegemist enim levinud tehismäärgala süsteemiga (Vymazal, 2008b). HSSF tehismäärgala koosneb enamasti riskülikukujulisest filterkehast sügavusega 0,8-1,5 meetrit, selle peal kasvavast taimestikust ning vettpidavast aluskihist, aluspind muudetakse veekindlaks geomembraani kihiga või saviekraaniga (Noorvee *et al.*, 2007). Reovesi siseneb pinnasfiltrisse sisselaske torustikust ning vesi liigub horisontaalselt läbi tehismäärgala filterkeha (Joonis 3). Enne kui vesi väljub pinnasfiltri väljalaske torustikust, läbib ta veetaseme reguleerimise konstruktsiooni. (Vymazal, 2008b)



Joonis 3. Horisontaalse läbivooluga pinnasfiltri skeem. 1 suurte kividega tsoon, sissevoolu ühtlaseks jaotumiseks; 2 vettpidav kiht; 3 filtermaterjal; 4 taimestik; 5 veetase märgalas; 6 väljavoolu kogumistsoon; 7 äravoolutoru; 8 väljavoolu struktuur (kaev) koos veetaseme reguleerimisega. (Vymazal, 2001)

Selleks et horisontaalse läbivooluga pinnasfiltris tagada optimaalseim hüdrauliline juhtivus, kasutatakse filtermaterjalina enamasti jämedateralist liiva (läbimõõduga ≤ 5 mm), kruusa (läbimõõduga 6-12 mm) või kergkruusa (läbimõõduga 2-4 mm) (Noorvee *et al.*, 2007). Kui kasutada filterkehana väga peeneteralist materjali, võib pinnasfilter ummistuda ning reovee viibeag filterkehas väheneb, seega ka puhastusefektiivsus langeb, soovituslik viibeag HSSF pinnasfiltris võiks olla pikem kui 15 päeva (Vymazal, 2005; Noorvee *et al.*, 2007). Peamised taimed, mida tehismärgalal kasutatakse on harilik pilliroog (*Phragmites Australis*) ja laialeheline hundinui (*Typha latifolia*) (Vymazal, 2005; Noorvee *et al.*, 2007). Taimestiku peamisteks funktsioonideks on külmal perioodil soojusisolatsioonina toimimine ning hapniku transport juurestiku kaudu juurtepiirkonda. Samuti pakub taimestik pinda mikroorganismidele kinnitumiseks soodustades sellega mikroorganismide elutegevust. Taimede juured vähendavad filtri ummistumise ohtu, taimestik pakub jätkusuutlikku elupaika loomadele ning annab pinnasfiltrile esteetilise välimuse (Noorvee *et al.*, 2007; Vymazal, 2008b). Samuti aitab taimestik ära hoida pinnase erosiooni (Vymazal 2011). Kasvuperioodi lõpus taimestikku ei eemaldata, kuna taimejäänused toimivad väga hea soojusisolaatorina ning surnud taimestik

eemaldatakse alles varakevadel, kui temperatuurid ei lange enam väga madalale (Vymazal, 2011).

Tehismärgala suurus peaks olema umbes $3\text{--}5\text{ m}^2\text{ IE}^{-1}$ ning külgede pikkuse ja laiuse suhe soovitatavalt 3:1 (Noorvee *et al.*, 2007). Soovituslik hüdrauliline koormus jääb vahemikku $20\text{--}30\text{ mm ööp}^{-1}$ ning märgala põhjakalle peaks olema umbes 1% (Noorvee *et al.*, 2007).

2.1.2. Horisontaalse läbivooluga pinnasfiltri kasutusala

Kui enamus HSSF pinnasfiltreid on projekteeritud puhastama olmereovett, siis tänapäeval kasutatakse neid ka muude reovete puhastamiseks nagu näiteks erineva koostisega tööstuslikud reoveed, põllumajanduslik reovesi, prügila nõrgvesi ja sademevesi (Vymazal, 2009).

2.1.3. Horisontaalse läbivooluga pinnasfiltris toimuvad protsessid

HSSF pinnasfiltris on esindatud nii aeroobsed, anaeroobsed kui ka anoksilised tsoonid, kuid ülekaalus on aeroobsed ja anoksilised tingimused (Vymazal, 2002). Aeroobsed tsoonid asuvad pinnasfiltri ülemises osas ning taimejuurte ümbruses, kuna hapniku sattumine tehismärgalasse toimub peamiselt taimede kaudu ning difusiooni teel atmosfäärist (Hu, 2012).

HSSF pinnasfiltrid eemaldavad reoveest kõige suurema efektiivsusega orgaanilist materjali (BHT_5 ja KHT) ja heljumit, toitainete nagu lämmastik ja fosfor eemaldamine ei ole sedavõrd efektiivne. Orgaanilise materjali lagundamine toimub filterkehas nii aeroobsetel kui ka anaeroobsetel tingimustel. Tšehhis kasutusel olevate HSSF pinnasfiltrite näitel on leitud, et keskmine BHT_5 eemaldamise efektiivsus on 88% ning KHT eemaldamise efektiivsus on 74,9% (Vymazal, 2002). Heljumi eemaldamisel on peamisteks protsessideks filtratsioon ning settimine (Vymazal, 2002). Ka mikroobne reostus (patogeenid) eemaldatakse HSSF pinnasfiltris edukalt erinevate füüsiliste, keemiliste ja bioloogiliste protsesside tulemusel (Vymazal, 2002).

2.1.4. Horisontaalse läbivooluga pinnasfiltri opereerimine ja kulud

Pinnasfilter efektiivseks toimimiseks, tuleb kord aastas tühjendada eeltöötluses kasutatavat septikut ning puhastada sissevoolu ja väljavoolu torustikku, eemaldada sealt muda ja biokile,

mis on võivad ummistada torustiku. Kui juhtub, et pinnasfilter ummistub, tuleb sissevool filterkehasse peatada ning filtril tuleb lasta ära kuivada. Kui filtri kuivatamine ei toimi, tuleb filterkeha ülemine 10 cm eemaldada. (Brix & Arias, 2005; Noorvee *et al.* 2007)

Filterkeha läheduses kasvavad puud tuleb kindlasti eemaldada, kuna puu juurestik võib kahjustada HSSF filtri geomembraani (Noorvee *et al.* 2007). Selleks et HSSF toimiks efektiivselt tuleks hoida veetase filterkehas 0,7-0,9 meetri vahemikus, liiga madal veetase võib tähendada, seda, et taimede juured ei ulatu veeni ning puhastusefektiivsus langeb (Noorvee *et al.*, 2007).

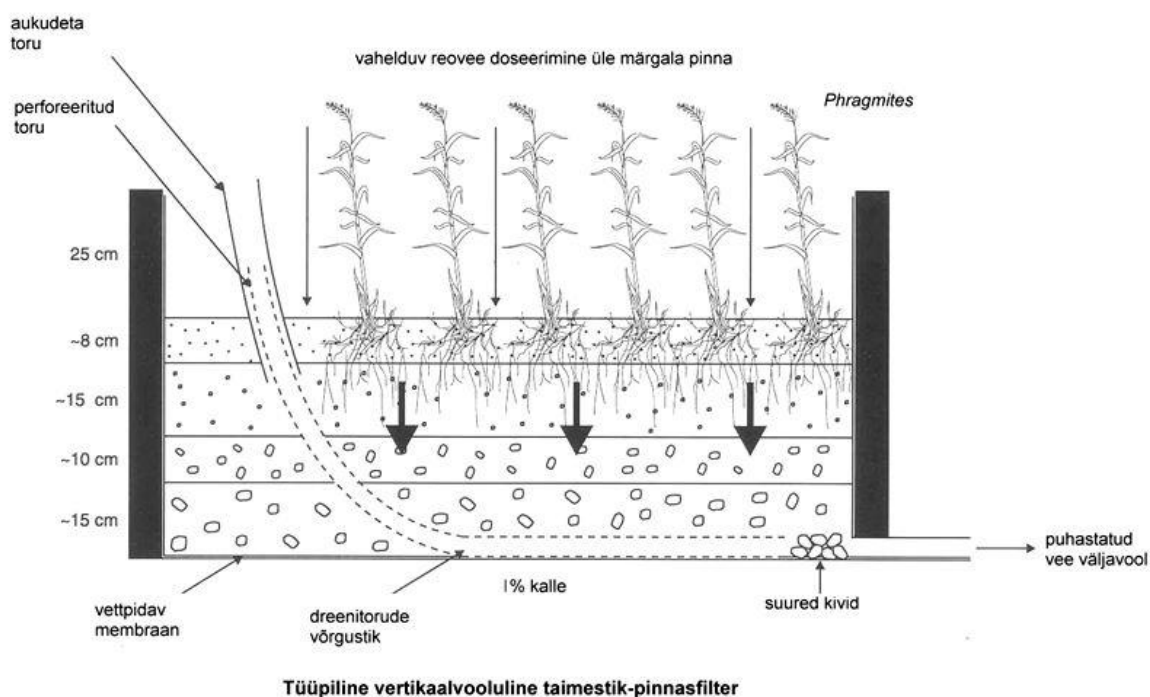
HSSF pinnasfiltri hind koos eelpuhastusega on tänapäeval hinna poolest samal tasemel tavapäraste veepuhastussüsteemidega, kuid HSSF pinnasfiltri opereerimiskulud on tunduvamalt madalamad. HSSF filtri töös pole vaja kasutada elektrienergiat: peamised opereerimiskulutused, mis tekivad, on seotud eeltötlusega (Vyzamal, 2009).

2.2. Vertikaalse läbivooluga pinnasfiltersüsteemid

2.2.1. Vertikaalse läbivooluga pinnasfiltri üldine kirjeldus

Vertikaalse läbivooluga (VSSF) pinnasfilter koosneb erineva hüdraulilise juhtivusega kihilisest filterkehast, vettpidavast kihist ning torustikust (Joonis 4). Reovesi pumbatakse perioodiliselt otse filterkeha pinnale ning vesi imbub vertikaalselt filtri põhja ja voolab järgmisesse puhastusetappi (Karabelnik, 2012). Soovitavalt pumbatakse reovett filterkehale 12 korda ööpäevas 2 tunniste vahedega (Noorvee *et al.*, 2007). Tagamaks vee kiiret äravoolu filtri alumises kihis, on filterkeha pealmine kiht väikese hüdraulilise juhtivusega ning alumine kiht suure hüdraulilise juhtivusega (Noorvee *et al.*, 2007). Vee kiire äravool alumises kihis põhjustab õhu kaasatõmbamise filterkehale. Õhuhapniku parem juurdepääs tagab märgalas efektiivsemad puhastusprotsessid ning nitrifikatsiooni protsessi tõhususe (Hu, 2012). Pealmise kihi väike hüdrauliline läbilaskvus on vajalik selle jaoks, et reoveel oleks piisavalt pikk kontakt filterkehal asuvate bakteritega (Vymazal, 2008b). Reovee filterkehale pumpamine toimub mööda jaotustorusid, mis võivad olla kaetud täitepinnasega või olla katmata (Vymazal, 2008b). Filterkeha ummistumise vältimiseks on soovitatud rajada 2 paralleelset peenart ja vahelduvalt nädalase intervalliga koormata kumbagi peenart (Noorvee *et al.*, 2007). VSSF pinnasfilter tuleb toime hüdraulilise koormusega vahemikus 200-1200 mm ööp⁻¹ ning tavaliselt hüdraulilise koormusega alla 800 mm ööp⁻¹ ei teki ka mingeid

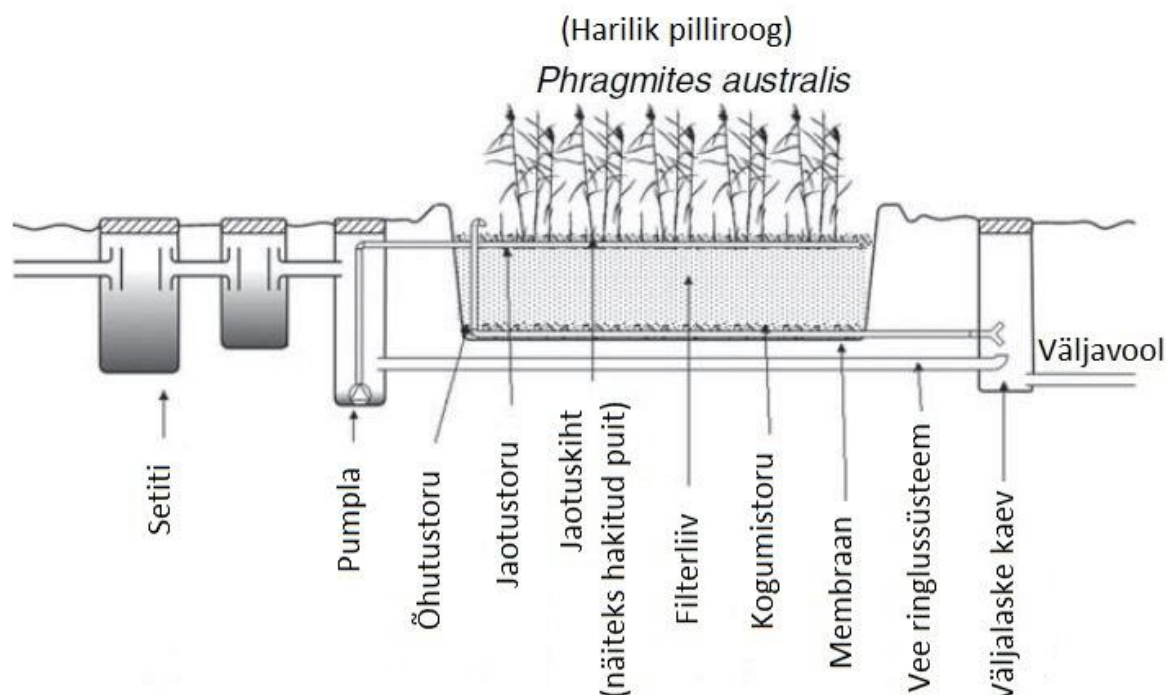
ummistumise probleeme. Pinnasfiltri jaoks vajaminev pindala võiks olla vahemikus $0,9...5 \text{ m}^2 \text{ IE}^{-1}$, kuid enamus märgalasid konstrueeritakse suuruses $2-3 \text{ m}^2 \text{ IE}^{-1}$ (Vymazal, 2008b). Eestis on soovituslik pindala tagasipumpamiseta süsteemi puhul vahemikus $2,5...3 \text{ m}^2 \text{ IE}^{-1}$ ning tagasi pumpamisega vahemikus $1,7...2 \text{ m}^2 \text{ IE}^{-1}$ (Noorvee *et al.*, 2007).



Joonis 4. Tüüpiline vertikaalvooluline taimestik-pinnasfilter (Vymazal *et al.*, 1998).

Enamasti on VSSF pinnasfiltri sügavuseks 0,8-1,8 meetrit, filtri sügavus valitakse filterkeha materjali põhjal, mida parem on selle hüdrauliline juhtivus, seda sügavam on filterkeha.

VSSF pinnasfiltri tõhususe tõstmiseks on välja töötatud ka mehhanism, kus juba ühe korra filterkeha läbinud vesi suunatakse tagasi filtri pinnale (Joonis 5), et tõhustada puhastusefektiivsust ning pikendada vee kokkupuute pinda filterkehaga (Prost-Boucle & Molle, 2012).



Joonis 5. Ühe majapidamise VSSF pinnasfiltri skeem, kus reovesi kõigepealt eeltöödeldakse 2 m³ setitis. Setitatud reovesi pumbatakse perioodiliselt filterkeha pinnale ning puhastatud vesi suunatakse kogumistorustiku kaudu väljalaske kaevu, kus pool puhastatud veest suunatakse uuesti filterkehale. (Brix & Arias, 2005)

2.2.2. Vertikaalse läbivooluga pinnasfiltri kasutusala

VSSF pinnasfiltri peamiseks väljatöötamise eesmärgiks oli luua süsteem, mis muudaks nitrifikatsiooni tõhusamaks (Hu, 2012). VSSF pinnasfiltrid annavad reovee puhastusprotsessi tarbeks süsteemi hapnikku. Enamasti kasutatakse VSSF filtreid eramajade kohapealseks reoveepuhastuseks või väikese kogukonna olmereovee puhastuses.

2.2.3. Vertikaalse läbivooluga pinnasfiltris toimuvad protsessid

Hapnik siseneb VSSF tehismärgalasse kolmel viisil: sisend konvektsiooni teel, sisend taimejuurte kaudu ja sisend difusiooni teel. Efektiivne aeratsioon saavutatakse väljavoolava vee poolt tekitatud alarõhu tõttu. Õhu kaasatõmme on võrdeline väljavoolava vee mahuga. Filterkeha hea aereerituse tõttu on ka nitrifikatsioon tõhusam ning selle efektiivsus on 90% juures (Hu, 2012). Hea aereerituse tõttu on inhibeeritud denitrifikatsiooni protsess märgalas ja

anoksiliste tsoonide puudumise tõttu on $N_{\text{üld}}$ eemaldamine keeruline (Hu, 2012; Vymazal, 2008b). Samuti on fosfori eemaldamise efektiivsus madal, kuid kõrge sorptsioonivõimega filtermaterjali kasutamisega saab seda parandada (Hu, 2012). See tähendab aga filtermaterjali välja vahetamist teatud perioodi järel. VSSF pinnasfilter eemaldab reoveest hästi orgaanilist materjali, heljumit ning ammoniumlämmastikku (Vymazal, 2008b).

Ka taimede roll on VSSF pinnasfiltris tähtis, kuna nad stabiliseerivad märgala pinda. Taimede juured parandavad hüdraulilist juhtivust, taime juurte kaudu siseneb ka täiendavalt hapnikku filtrisse ning taimed aitavad vältida tehismärgala ummistumist (Vymazal, 2008b).

3. Annus-tüüpi tehismärgala

3.1 Annus-tüüpi tehismärgala kirjeldus

Annus-tüüpi tehismärgala tehnoloogia erineb pidev-toitelistest tehismärgalade süsteemidest selle poolest, et reovett ei juhita tehismärgala pinnale pidevalt. Tehismärgala täidetakse reoveega, jäetakse mõneks ajaks reoveega täidetuna seisma ja seejärel tühjendatakse. Selle protsessi eesmärgiks on suurendada nii aeroobsete kui ka anaeroobsete protsesside tõhusust ning tõsta tehismärgala puhastusefektiivsust. (Karabelnik, 2012)

3.2 Ilmatsalu annus-tüüpi tehismärgala

Ilmatsalu annus-tüüpi tehismärgala ehitati olemasoleva aktiivmuda puhasti juurde 2005. aasta suvel, et kindlaks määrata, kui suur on pinnasfiltri puhastusefektiivsus, kui kasutada annus-tüüpi süsteemi. Süsteem koosnes 2 m³ ruumalaga septikust, jaotuskaevust, väljavoolu- ja retsirkulatsioonikaevust ning 8-st samasugusest tehismärgala mahutist, mis olid pindalaga 1 m² ja sügavusega 1,15 meetrit. Tehismärgala oli täidetud 2-4 mm tera läbimõõduga kergkruusaga, millel on kõrge hüdrauliline juhtivus ja head isolatsioonilised omadused. Tehismärgala külmumise vältimiseks kaeti talvel pinnasfiltri pind 50 mm vahtplastiga. Sisse- ja väljavoolu kontrolliti solenoidklappidega. (Karabelnik, 2012)

Ilmatsalu annus-tüüpi tehismärgala puhastustsükkel koosnes filterkeha täitmisest, viibeajast, tühjendusest ja taastumisajast. Tehismärgala opereerimise käigus katsetati erinevatel

ajaperioodidel 6 erinevat režiimi, mille parameetrid on näha tabelis 1. Kogu katseperioodi vältel oli pinnasfiltri hüdrauliline koormus umbes $0,5 \text{ m}^3$ ja hüdrauliline viibeaeg septikus 4 päeva. Reovesi aktiivmuda puhasti liivapüünistest pumbati kõige pealt septikusse, kust see voolas edasi sissevoolu kaevu ning pumbati edasi läbi solenoidklappide filterkehale. Ajal, millal üht tehismärgala mahutit tühjendati, täideti teist ja nii kõigi mahutite puhul. Annustüüpi tehismärgalade puhul on võimalik puhastusefektiivsuse tõstmiseks kasutada heitvee tagasipumpamist. (Karabelnik, 2012)

Tabel 1. Ilmatsalu tehismärgala erinevate režiimide parameetrid ja keskmised vee näitajad. (Karabelnik, 2012)

Parameeter	Režiim					
	1	2	3	4	5	6
Kestvus	Nov-Dets	Jaan-Märts	Märts-Mai	Mai-Juuli	Aug-Okt	Okt-Dets
Vee tase pinnasfiltri mahutis (m)	1,1	0,8	1,1	1,1	1,1	1,1
Viibeaeg (päevades)	7	~5,3	~5,3	3,5	2,3	1,8
Taastumisaeg (tundides)	~23	~17	~17	~11	~7	~5
Retsirkulatsiooni määr (%)	0	0	20	100	200	300
$Q \text{ (m}^3 \text{ ööp}^{-1}\text{)}$	0,47	0,46	0,53	0,47	0,47	0,47
pH	7,5	7,3	7,3	7,2	7,2	7,3
Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	5,4	3,1	7,3	13,4	14,6	8,4
$\text{BHT}_7 \text{ (mg L}^{-1}\text{)}$	135	191	168	237	206	100
Heljum (mg L^{-1})	33	48	37	66	97	55
KHT_{Cr}	224	311	248	385	383	163
$N_{\text{üld}}$	54	44	33	68	82	40
$P_{\text{üld}}$	6,6	6,6	5,8	8,1	10,3	6,6

Sisse- ja väljavoolus mõõdeti järgmisi näitajaid: pH, BHT_7 , heljum, KHT_{Cr} , $N_{\text{üld}}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $P_{\text{üld}}$, temperatuur ja lahustunud O_2 . Puhastusefektiivsused väljavoolus on nähtavad tabelis 2. Kõigi kuue perioodi vältel saavutati normatiivsed väärtused ainult KHT_{Cr}

ja heljumi puhul. BHT_7 normatiivsed väärtused saavutati ainult 5. ja 6. perioodi ajal, kui kasutati heitvee tagasi pumpamist retsirkulatsiooni määraga 200% ja 300%. 1., 2. ja 3. perioodi puhastusefektiivsustes ei olnud suuri erinevusi, seega järeldati, et 20% retsirkulatsiooni määral on tühine mõju puhastusefektiivsusele. Üldlämmastiku ja –fosfori normatiivseid väärtuseid katse jooksul ei saavutatud. Katse käigus keskmised pH väärtused langesid ning olid väljavoolus madalamad sissevoolu väärtustest. $N_{\text{üld}}$ puhastusefektiivsused olid esimese 3 perioodi vältel väga madalad. $N_{\text{üld}}$ puhastusefektiivsused olid olulisemalt kõrgemad perioodidel, kui kasutati suuremat retsirkulatsiooni määra. Sellest tulenevalt järeldati, et suurema retsirkulatsiooni puhul on hapniku ligipääs pinnasfiltrisse parem, mis tõhustab lämmastiku ärastamist. 6. perioodi puhastusefektiivsus oli mõnevõrra väiksem 5. perioodi omast, mis võis tuleneda orgaanilise süsiniku defitsiidist reovees. Fosfori ärastuse efektiivsus sõltub pinnasfiltris peamiselt filtermaterjalist ja selle pH-st. Kõrgema pH puhul on fosfori sidumine filtermaterjali tõhusam, sellest tulenevalt võivadki fosfori puhastusefektiivsused erinevatel perioodidel erineda. (Karabelnik, 2012)

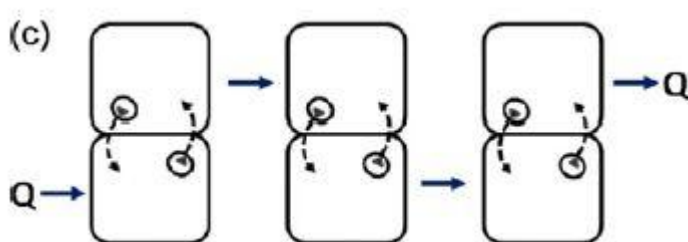
Tabel 2. Ilmatsalu annus-tüüpi tehismärgala puhastusefektiivsused. (Karabelnik, 2012)

Periood	Puhastusefektiivsus (%)				
	BHT_7	Heljum	KHT_{Cr}	$N_{\text{üld}}$	$P_{\text{üld}}$
1	88	82	70	16	62
2	74	91	61	0	36
3	83	81	69	8	41
4	91	83	83	43	53
5	96	84	90	51	53
6	95	89	85	48	44

4. Loodete-tüüpi tehismärgala

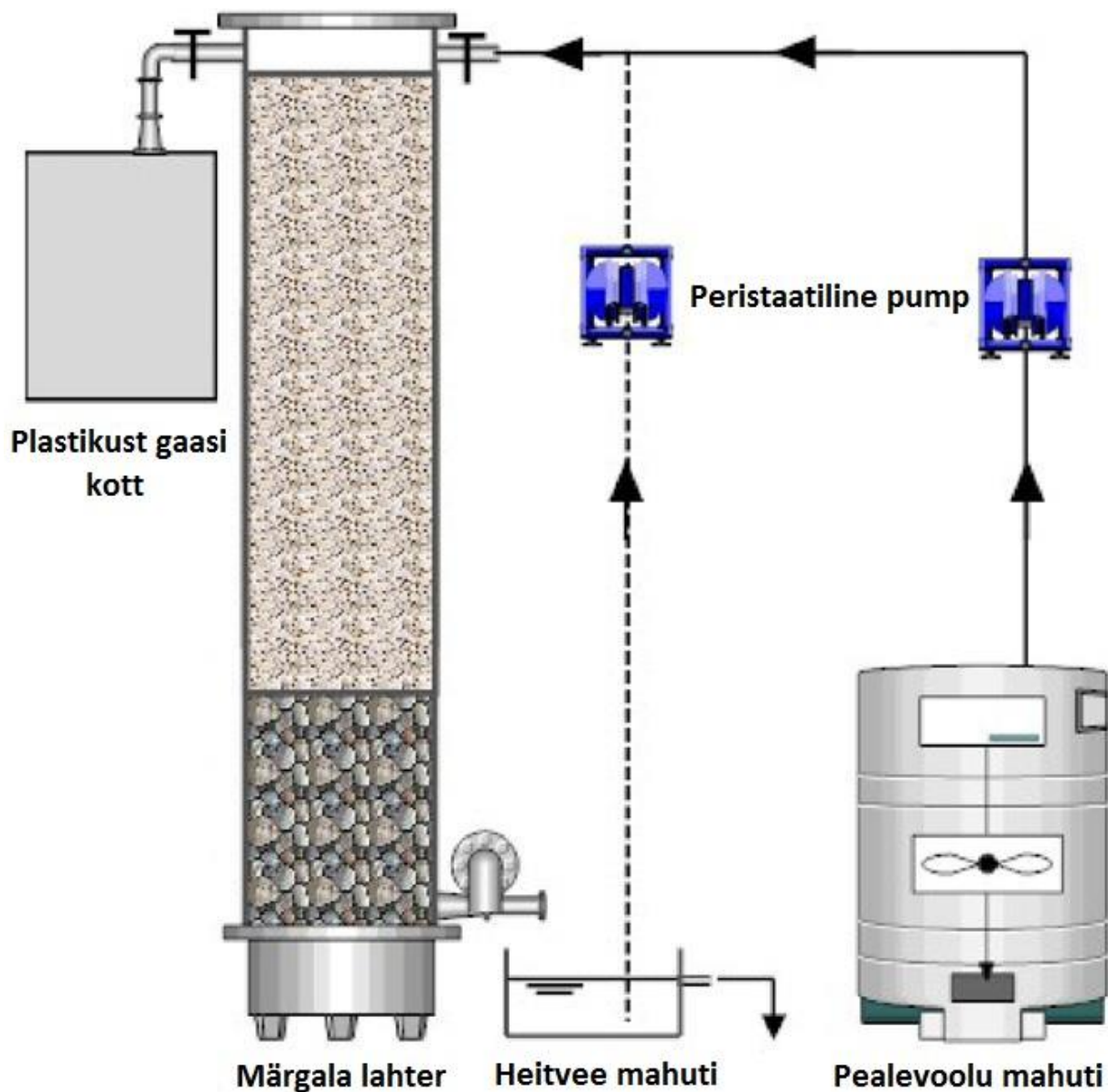
4.1. Üldine loodete-tüüpi tehismärgala kirjeldus

Loodete-tüüpi tehismärgala (TFCW) puhastussüsteem on suhteliselt uus tehnoloogia, mida iseloomustavad päevas mitu korda vahelduvad üleujutuse ja kuivenduse tsüklid. Tehismärgala koosneb mitmest mahutist, vahelduvate tsüklite tekkimiseks pumbatakse reovesi ühest mahutist teise (joonis 6). Reovee sisse- ja väljavoolul agregaadi tühimikesse tõmmatud õhk varustab biokilet hapnikuga. Mida parem on biokile varustatus hapnikuga, seda efektiivsemad on reovee puhastusprotsessid ning tehismärgala tõhusus on suurem (Wu *et al.*, 2011).



Joonis 6. Loodete-tüüpi tehismärgala: kolm paaris mahuti lahtrit, millel on kolbpumbad. Igas mahuti lahtri paaris vesi ringleb ja ülevool suunatakse järgmisesse mahuti lahtri paari. Esimeste lahtrite puhul on paralleelselt 3 mahuti lahtrit, et süsteem saaks puhata, kuid lihtsustamise mõttes pole kujutatud. Q-ga on tähistatud veevool. (Austin & Nivala, 2009)

TFCW-d on enamasti katsetatud labori tingimustes. Wu *et al.* (2011) läbi viidud uuringus hinnati laboris konstrueeritud loodete-tüüpi tehismärgala jõudlust (Joonis 7). Tegemist oli üheastmelise märgalasüsteemiga, kus 1500 mm kõrgune ja 180 mm diameetriga toru täideti kahe kihi erineva hüdraulilise juhtivusega filtermaterjaliga. Märgalasüsteem suleti ning kunstlik reovesi pumbati märgala pinnale ülevalt. Kogu märgalasse sisenevas ja väljuvas õhus mõõdeti CO₂ ja O₂ sisaldus. Üleujutuse ja kuivenduse tsüklid vahetusid iga kolme tunni järel.

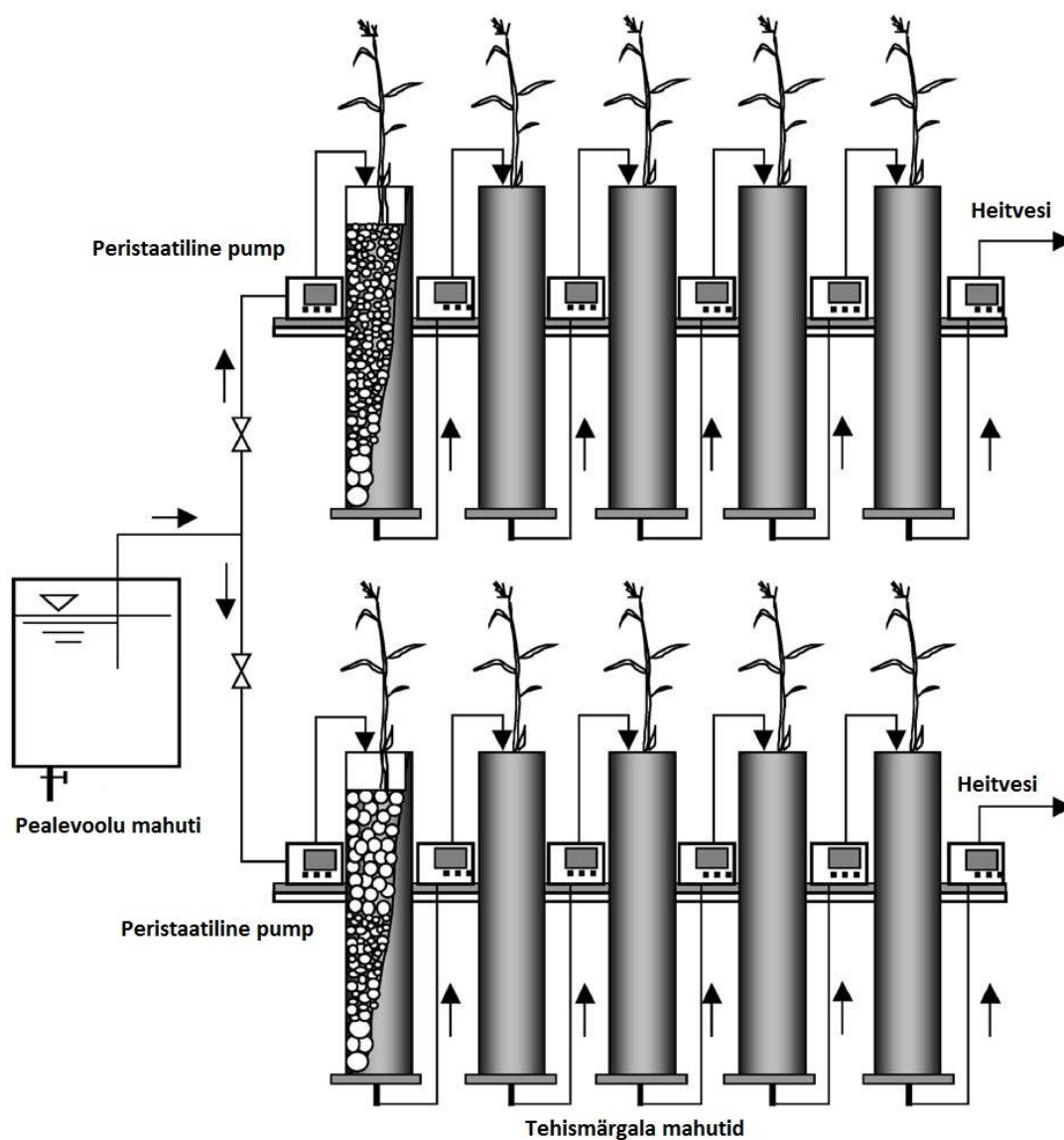


Joonis 7. Laboris konstrueeritud loodete-tüüpi tehismärgala skeem. (Wu *et al.* 2011)

Läbi viidud uuringus leiti, et hapniku liikumine vette on tunduvalt tõhusam TFCW süsteemides, kui tavapärastes tehismärgalades. BHT₅ väärtuste suurenemisel 174 g BHT m⁻² ööp⁻¹-st 330 g BHT m⁻² ööp⁻¹-ni täheldati filterkeha ummistumist, kuid seda peamiselt heterotroofse biokile kasvu ning sellega kaasneva nitrifikatsiooni inhibeerimise tõttu (Wu *et al.*, 2011).

Loodete-tüüpi tehismärgalasid on katsetatud kahte ka tüüpi filterkehaga (Zhao *et al.*, 2004). Esmalt katsetati filterkehaga, kus filtermaterjali tera suurused on analoogselt vertikaalse vooluga pinnasfiltrile pealmistes kihtides väiksemad ning progresseeruvalt alla poole liikudes

terasuurus suureneb, seega ka filterkeha hüdrauliline juhtivus suureneb filtri alumiste kihtide suunas (Joonis 8) (Zhao *et al.*, 2004). Hiljem töötati välja süsteem, kus tehismärgala mahuti pealmisesse kihti paigaldati peene terasuurusega filtermaterjali asemel suure tera läbimõõduga filtermaterjal, sellele järgnes peeneteraline materjal ning tehismärgala põhjas oli taas suure tera läbimõõduga materjal (Joonis 8) (Zhao *et al.*, 2004). Sellise süsteemi loomise eesmärk oli tehismärgala filterkeha ummistumise esinemise vähendamine. Mõlema süsteemi puhul esines filterkeha ummistumist, kuid tehismärgala, kus pealmiseks kihiks oli suurema terasuurusega filtermaterjalid, ummistus tunduvalt hiljem võrreldes teist tüüpi süsteemiga.



Joonis 8. Ülemisel skeemil on kujutatud tehismärgala mahutit, kus terasuurus kasvab mahutis ülevalt alla liikudes ja alumisel skeemil on näha tehismärgala mahuti, kus pealmiseks kihiks on suure terasuurusega filtermaterjal (Zhao *et al.*, 2004)

4.2. Protsessid loodete-tüüpi tehismärgalasüsteemides

Labori tingimustes konstrueeritud loodete-tüüpi tehismärgala (joonis 7) jõudluse hindamiseks tuleb vaadelda mitmeid erinevaid tehismärgala näitajaid: hapniku ülekande jõudlus, orgaanilise aine ja ammooniumi eemaldamine (Wu *et al.*, 2011). Senistest katsetest on järeldatud, et hapniku transport on loodete-tüüpi tehismärgalades tunduvalt kiirem ja tõhusam, kui tavapärastes tehismärgalades, mille tulemusel on tõhusam BHT₅ ja NH₄⁺ ärastamine. Teoreetiline hapnikutarve BHT₅ ärastamisest ja nitrifikatsioonist oli ligikaudu võrdne mõõdetud hapniku varuga, mis viitas BHT₅ ja NH₄⁺ aeroobsele tarbimisele loodete-tüüpi süsteemis. Ka kõrgete BHT₅ väärtuste (148 g BHT m⁻² ööp⁻¹ kuni 294 g BHT m⁻² ööp⁻¹) juures jäi hapniku kontsentratsioon tehismärgalas samaks ning aeroobne seisund säilis loodete-tüüpi tehismärgalas. Kui BHT₅ väärtused tõusid 174 g BHT m⁻²ööp⁻¹ kuni 330 g BHT m⁻²ööp⁻¹, täheldati märgala ummistumist, enamasti ülemäärasest heterotroofse biokile kasvust tingitud nitrifikatsiooni aeglustumise tõttu. Nitrifikatsiooni aeglustumise põhjustas tõenäoliselt hapniku transpordi limitatsioon paksenenud biokiles, kuid ummistumine ise ei tõkestanud hapniku juurdevoolu puhastussüsteemi. (Wu *et al.*, 2011)

4.3. Loodete-tüüpi tehismärgalasüsteemi energiakulu

Samuti on tähtsaks näitajaks tehismärgala energiakulu. Tehismärgala energiakulu ei sõltu ainult tehnoloogiast, mida kasutatakse reovee puhastamiseks, vaid ka märgala asukoha tingimustest ja märgala ehitusest. Muidugi mõjutab ka suurel määral energiakulu reovee koostis, suurema koguse saasteainete juures on vaja kulutada vee puhastamiseks rohkem energiat.

Energiakulu põhineb vajadusel oksüdeerida orgaanilist süsinikku ja ammooniumi. Seega loodete-tüüpi tehismärgalade energiatarve on kogu energia, mis kulub reovee pumpamiseks ühest lahtrist teise, et hapnik pääseks süsteemi. Lahtrite suurus valitakse vastavalt KHT määrale, et vältida märgala ummistumist heterotroofse biokile tekkimisel. (Austin & Nivala, 2009)

Selle asemel, et loodete-tüüpi tehismärgala süsteemides hapnik suruda avatud vette, kasutatakse ära vee ja hapniku kokkupuudet vee liigutamisel ühest lahtrist teise. Seega kasutatakse ära suur katiooni vahetuse pind. Sellest tulenevalt võib öelda, et loodete-tüüpi

tehismärgalad on energiatõhusad süsteemid reovee puhastamiseks ja lämmastiku ärastamiseks. (Austin & Nivala, 2009)

Kuid energiatõhusus pole ainuke faktor, mida arvesse võtta veepuhastussüsteemi loomisel, ka süsteemi suurus on määravaks teguriks. Loodete-tüüpi tehismärgalad on võrreldes aktiivmuda puhastitega pindalalt üpris suured. Loodete-tüüpi tehismärgala on tõhus energeetiliselt kasutades $0,21 \text{ kWh}/(\text{m}^3\text{ööp})$ ja olles pindalaga $5,0 \text{ m}^2/(\text{m}^3\text{ööp})$. Enamasti, kui protsessi energiatarve suureneb, väheneb süsteemi pindala. (Austin & Nivala, 2009)

4.4. Temperatuuri mõju loodete-tüüpi tehismärgalasüsteemile

Temperatuur mõjutab hapnikukande efektiivsust aereeritavates süsteemides ja protsessi kineetikat ka üldiselt. Kõige enam mõju avaldab temperatuur märgala efektiivsele toimimisele (Austin & Nivala, 2009). Külmas kliimas, kus maapind külmub enam kui 1 meetri sügavuselt, külmub märgala pind sügavuti läbi. Märgala külmumist saab vältida, kui see soojustada multšiga (Wallace, 2001). Kui nitrifikatsioon on vajalik, siis ei saa soojustamata märgala tehnoloogiaid kasutada külmas kliimas, kuna nitrifikatsiooni protsessid on pärsitud, kui temperatuur langeb alla $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Samas soojas kliimas, kus vee temperatuur on kõrgem kui $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, on madala lahustunud hapniku kontsentratsiooni tõttu suurem tõenäosus niitjate bakterite tekkeks, mis muudavad märgala mudaseks. Loodete-tüüpi tehismärgalad on kõige sobivamad mõõdukasse kuni sooja kliimasse, kus märgala efektiivsust ei piira külmumine (Austin & Nivala, 2009).

5. Protsessid tehismärgalades

Reoveepuhastus tehismärgalades põhineb peamiselt erinevatel füüsikalistel, keemilistel ja bioloogilistel protsessidel. Reoveepuhastuses on tähtsad toitainete ja heljumi eemaldamine ning need protsessid toimuvad aeroobsetes, anaeroobsetes või anoksilistes tingimustes. Toitainete eemaldamisel keskendutakse peamiselt lämmastikule ja fosforile. Samuti loob tehismärgala sobiliku keskkonna mikroorganismidele. Mikroorganismid kinnituvad filtermaterjalile ning moodustavad biokile, kus toimuvad erinevad bioloogilised protsessid (Noorvee, *et al.*, 2007).

5.1. Lämmastik

Lämmastik esineb reovees mitmete erinevate orgaaniliste ja anorgaaniliste vormidena ning on keerulise biogeokeemilise tsükliga. Peamised lämmastiku anorgaanilised ühendid, mis märgalasüsteemides esinevad on ammoonium (NH_4^+), nitraat (NO_3^-), nitrit (NO_2^-), gaasiline lämmastik (N_2), dilämmastikoksiid (N_2O), lämmastikdioksiid (NO_2) ja ammoniaak (NH_3) (Vymazal, 2007). Tehismärgalas erinevate protsesside tulemusel muutuvad lämmastikuühendid anorgaanilistest ühenditest orgaanilisteks ning vastupidi, peamised lämmastikuga seotud muutumised on toodud tabelis 3 (Vymazal, 2007).

Tabel 3. Lämmastiku muutumine tehismärgalades (Vymazal, 2007)

Protsess	Transformatsioon
Ammooniumi lendumine	Ammonium-N (aq) → ammoniaak-N (g)
Ammonifikatsioon	Orgaaniline N → ammonium-N
Nitrifikatsioon	Ammonium-N → nitrit-N → nitraat-N
Nitraadi ammonifikatsioon	Nitraat-N → ammonium-N
Denitrifikatsioon	Nitraat-N → nitrit-N → gaasiline N ₂ , N ₂ O
Lämmastiku sidumine	Gaasiline N ₂ → ammonium-N (orgaaniline N)
Taimedepoolne sidumine ja assimilatsioon	Ammonium-, nitrit-, nitraat-N → orgaaniline N
Ammooniumi adsorptsioon	Ammonium-N → gaasiline N ₂
ANAMMOX (anaeroobne ammooniumi oksüdatsioon)	Ammonium-N → gaasiline N ₂

Kõik need protsessid ei eralda veest lämmastikku vaid muudavad lämmastiku vormi (Vymazal, 2007). Lämmastikku eraldavateks protsessideks on näiteks lämmastiku lendumine, denitrifikatsioon, ammoniaagi adsorptsioon, ANAMMOX ja taimedepoolne lämmastiku omastamine, juhul kui taimeosad regulaarselt eemaldatakse (Vymazal, 2007). Lämmastiku suhtelisi koguse muutusi erinevates märgalades võib näha tabelis 4.

Tabel 4. Võimalikud suhtelised N muutuste suurusjärgud erinevates tehismärgalades. (Vymazal, 2007)

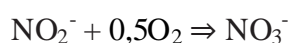
Protsess	FWS	HSSF	VSSF
N lendumine	Keskmine	Tühine	Tühine
Ammonifikatsioon	Kõrge	Kõrge	Kõrge
Nitrifikatsioon	Keskmine	Väga madal	Väga kõrge
Denitrifikatsioon	Keskmine	Väga kõrge	Väga madal
Sidumine mikroobide poolt	Madal	Madal	Madal
Sidumine taimede poolt^a	Madal	Madal	Madal
Ammoniaagi adsorptsioon	Väga madal	Väga madal	Väga madal
Orgaanilise N mattumine pinnasesse	Madal	Madal	Väga madal

Protsessid rasvases kirjas väljendavad N_{üld} eemaldamist reoveest.

^a juhul kui süsteemist eemaldatakse lõpuks taimed

Lämmastiku lendumine on protsess, kus ammooniumlämmastiku gaasiline ning hüdroksüülvorm on tasakaalus (Vymazal, 2007). Ammonifikatsioon ehk mineralisatsioon on bioloogilis-keemiline protsess, kus orgaaniline lämmastik bioloogiliselt lagundatakse ammooniumiks. Ammonifikatsiooni käigus vabaneb energia, mis mõnel juhul kasutatakse ära mikroobide poolt elutegevuseks ja kasvuks (Vymazal, 2007). Ammonifikatsioon leiab aset märgalas taimede lagunemisel (Sun *et al.*, 2005). Nitrifikatsioon on ammooniumi bioloogiline oksüdeerimine nitraadiks, mida viivad läbi kemolitotroofsed bakterid (Noorvee *et al.* 2007). Tegemist on aeroobses keskkonnas toimuva protsessiga ning nitrifikatsiooni toimumise efektiivsuse määrab hapniku kontsentratsioon filterkehas.

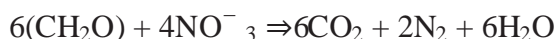
Nitrifikatsioon toimub kahes etapis (Kadlec & Knight, 1996):



Kokku võib võtta selle valemiga:



Denitrifikatsioon on protsess, mis viiakse läbi denitrifitseerijate bakterite toimel, ning toimub anoksilises keskkonnas. Protsessis redutseeritakse nitraatlämmastik molekulaarseks lämmastikuks või diämmastikoksiidiks. Denitrifikatsiooni protsessi valem on järgmine (Hauck, 1984; ref Vymazal, 2007):



Lämmastiku sidumise puhul, muudetakse gaasiline lämmastik ammoniumiks. Ka taimede poolne lämmastiku sidumine leiab tehismärgalas aset. Efektiivne taimedepoolne lämmastiku ärastamine toimub vaid avaveelistes tehismärgalades, kus kasvavad peamiselt veepinnal ujuvad taimed, kuna seal on võimalik taimeosade eemaldamine kõige aktiivsemal kasvuperioodil (Noorvee *et al.*, 2007). Lämmastiku ärastamise efektiivsus on sõltuvuses sellest, kui tihti eemaldatakse märgalalt taimestik. Lämmastiku ärastamine toimub ka teistes taimestikuga kaetud tehismärgalades, kuid selle osakaal on üpris väike. Leverenz *et al.* (2010) poolt läbi viidud uurimuses, kus uuriti anoksilise keskkonnaga pinnasfiltersüsteemides toimuva denitrifikatsiooni efektiivsust, leiti, et lämmastiku ärastamise efektiivsust tõstis denitrifikatsiooni ja taimedepoolne lämmastiku ärastamise koosmõju.

ANAMMOX on anaeroobne ammoniumi oksüdatsioon, see on anaeroobne protsess, kus ammonium ja nitrit muudetakse gaasiliseks N_2 . ANAMMOX reaktsioon on tunduvalt efektiivsem lämmastiku ärastamises kui nitrifikatsiooni ja denitrifikatsiooni reaktsioonid. Tehismärgalades toimub veel ka ammoniumi adsorptsioon. See reaktsioon kujutab endast ioonse ammoniumi adsorbeerumist anorgaanilisele settele või mullale. Kuid vee keemiliste omaduste muutumisel võib ammonium desorbeeruda setetest või mullast, kuna adsorbeerunud ammoniumi ja substraadi vahel on nõrgad sidemed (Vymazal, 2007).

5.2. Fosfor

Fosfor on ökosüsteemi jaoks tähtis toitaine, kuid kui seda koguneb liiga palju, siis koosmõjul lämmastikuga on nad peamised eutrofeerumise põhjustajad. Fosfor esineb enamasti vees ortofosfaadina, polüfosfaadina ja orgaanilise fosforina. Fosfori eemaldamise tehismärgalades

on üpris keeruline, kuna fosfor ei kao märgaladelt metaboolsete protsesside tulemusel vaid pigem akumuleerub tehismärgalas (Noorvee *et al.* 2007).

Tehismärgala eluea pikendamiseks ning veest fosfori ärastamise efektiivsuse tõhusamaks muutmiseks, tuleb leida märgalasse suure fosfori sidumisvõimega filtermaterjal (Brix & Arias, 2005; Vohla *et al.*, 2011). Vohla *et al.* (2011) läbi viidud uurimustöös katsetati erinevast materjalist filterkehadega tehismärgalade fosfori omastamise efektiivsust. Leiti, et keskmiselt langeb filterkeha fosfori omastamise efektiivsus pärast 5 aastat tugevalt. Seega tuleb mingi perioodi järel välja vahetada filterkeha materjal ning see tähendab, et jääb üle fosforiga küllastunud materjal. Üheks võimaluseks oleks kasutada tehismärgalast ülejäänud fosforiga küllastunud materjali väetisena (Vohla *et al.* 2011).

Fosfori sidumine tehismärgalades toimub peamiselt adsorptsiooni, taimse omastamise, kompleksühendite moodustumise ja sadestumise teel (Noorvee *et al.* 2007). Fosfori keemiliseks sadestamiseks kasutatakse enamasti Al- ja Fe-soolasid ning kustutatud lupja (Noorvee *et al.* 2007).

6. Parameetrite võrdlus

Tehismärgalasüsteemi luues tuleb arvesse võtta, kui suurt orgaanilise reostuse koormust märgala talub ilma ummistumiseta ja kui suur on tehismärgala hüdrauliline koormus. Nendest näitajatest lähtudes saab otsustada kui suur tehismärgala on vaja konstrueerida, et tagada piisavalt efektiivne reoveepuhastus. Avaveelise tehismärgala soovituslik orgaaniline reostuskoormus on alla 112 kg BHT ha⁻¹ ööp⁻¹ ja hüdrauliline koormus sõltuvalt reovee puhastusastmest 12-94 mm ööp⁻¹ (Vymazal *et al.*, 2008). Hüdrauliline koormus sekundaarsel puhastamisel peaks jääma vahemikku 12-47 mm ööp⁻¹ ning tertsiaarsel puhastamisel 19-94 mm ööp⁻¹ (Vymazal *et al.*, 2008). Orgaanilisest reostuskoormusest saab välja arvutada tehismärgala pindala ühe inimekvivalendi kohta. Veeseaduse (RT I, 06.05.2014, 8) § 2 p 34 alusel loetakse inimekvivalendiks ühe inimese põhjustatud tinglikku reostuskoormust, mis väljendatakse biokeemilise hapnikutarbe kaudu. Biokeemilise hapnikutarbe kaudu väljendatud inimekvivalendi väärtus on 60 g hapnikku ööpäevas. Tehismärgala pindala leidmiseks IE kohta tuleb leida inimekvivalendi väärtus ning jagada see tehismärgala pindalaga.

IE arvutamise valem:

$$IE = \frac{BHT \text{ kg ööp}^{-1}}{0,060 \text{ kg IE}^{-1} \text{ ööp}^{-1}}$$

Pindala IE kohta leiab tabelist 5. Horisontaalse läbivooluga pinnasfiltri hüdrauliline koormus on 20-30 mm ööp⁻¹ ja märgala suurus on 3-5 m² IE⁻¹ (Noorvee *et al.*, 2007). Vertikaalse läbivooluga pinnasfiltri soovituslik hüdrauliline koormus jääb vahemikku 200-1200 mm ööp⁻¹ ning märgala pindala inimekvivalendi kohta on 0,9-5 m² IE⁻¹ (Vymazal, 2008b). Kirjanduses on välja toodud, et loodete-tüüpi tehismärgala soovituslik hüdrauliline koormus jääb vahemikku 25-50 mm ööp⁻¹ (Brix, 1994), kuid Zhao *et al.* (2004) läbi viidud katsetes saadi head tulemused ka rakendades hüdraulilist koormust 430 mm ööp⁻¹. TFCW orgaaniline reostuskoormus soovitatakse hoida alla 200 g BHT m⁻² ööp⁻¹, kuna suuremate väärtuste puhul täheldati pinnasfiltri ummistumist (Wu *et al.*, 2011). Hüdraulilised koormused Ilmatsalu annus-tüüpi tehismärgalal jäid vahemikku 460-530 mm ööp⁻¹ ning pindalad IE kohta 0,54-1,28 m² IE⁻¹ (Karabelnik, 2012).

Puhastusefektiivsuse koha pealt on väga tähtsaks aspektiks hapniku juurdepääs tehismärgalasse, kuna hapnik on vajalik mitmete puhastusprotsesside toimimiseks. Seega saab tehismärgala tõhusust hinnata aeratsiooni võime põhjal. Erinevate tehismärgalade aeratsiooni võime on välja toodud tabelis 5. Avaveelise tehismärgala puhul tungib hapnik vette veepinna kaudu 1-2,5 g O₂ m⁻² ööp⁻¹, hapniku lahustuvus vette läbi avatud veepinna on suures sõltuvusest ilmastikust (Kuusik, 1995 *cit.* Noorvee *et al.*, 2007). Horisontaalse läbivooluga pinnasfiltri aeratsiooni võime ulatub 2,5-4 g O₂ m⁻² ööp⁻¹ (Noorvee *et al.*, 2007) ja vertikaalse läbivooluga pinnasfiltri aeratsiooni võime on kuni 30 g O₂ m⁻² ööp⁻¹ (Vymazal *et al.*, 1998). Sun *et al.* (2005) artiklis leiti, et TFCW aeratsiooni võime võib ulatuda kuni 473 g O₂ m⁻² ööp⁻¹. Ilmatsalu annus-tüüpi tehismärgalal tehtud katsete käigus jäi aeratsiooni võime 8-21,1 g O₂ m⁻² ööp⁻¹ ning oli väga suures seoses retsirkulatsiooni määraga nagu on näha tabelist 5. Suuremate retsirkulatsiooni määrade puhul oli ka aeratsiooni võime suurem, välja arvatud 300% retsirkulatsiooni määra puhul (Karabelnik, 2012). 300% retsirkulatsiooni määra puhul oli madalama aeratsiooni võime puhul määravaks reovee väiksem hapnikutarve (Karabelnik, 2012).

Tabel 5. Hüdraulilise koormuse, aeratsiooni võime ja pindala võrdlus.

CW tüüp	Retsirkulatsiooni määr	Hüdrauliline koormus (mm ööp⁻¹)	Pindala IE kohta (m² IE⁻¹)	Aeratsiooni võime (g O₂ m⁻² ööp⁻¹)
FWS		12-94	min. 5,26	1-2,5
HSSF		20-30	3-5	2,5-4
VSSF		200-1200	0,9-5	kuni 30
TFCW		25-50 või kuni 430	min. 0,30	kuni 473
Annus-tüüpi CW	0 %	470	0,95	8,5
	0 %	460	0,68	8
	20 %	530	0,67	10,7
	100 %	470	0,54	20,1
	200 %	470	0,62	21,1
	300 %	470	1,28	10,3

Tabelis 6 on välja toodud BHT, KHT, P_{üld} ja NH₄⁺-N ärastamise efektiivsused erinevate tehismärgala süsteemide näitel.

Tabel 6. Tehismärgalade puhastusefektiivsused erinevate süsteemide näitel.

Tehismärg- ala tüüp	BHT			KHT			P _{Üld}			NH ₄ ⁺ -N			Viide
	Sisse- vool (mg/l)	Välja- vool (mg/l)	Efektiivsus (%)	Sisse- vool (mg/l)	Välja- vool (mg/l)	Efektiivsus (%)	Sisse- vool (mg/l)	Välja- vool (mg/l)	Efektiivsus (%)	Sisse- vool (mg/l)	Välja- vool (mg/l)	Efektiivsus (%)	
FWS	339	66,5	77-80	583	154- 209	64-73,5	9	3-5	42-63,5	39,5	13-23	43-69	(Kotti <i>et al.</i> , 2010)
FWS	80	14,1	75,7				3,8	2,2	46,7				(Vy maza l, 2008a)
FWS				35	33,2- 37,4	0-5	0,361	0,143- 0,237	65	0,529	0,116- 0,248	53-78	(Martin <i>et al.</i> , 2013)
FWS	4-110	7-19	17-89				1-8,9	2,7,5	0-70	0,3- 23,5	0,2-14	29-93	(Greenway & Woolley, 1999)
HSSF	171	14,3	85,3	372	52	75,6	6,8	3,7	36,4	31,1	18,2	33,2	(Vy maza l, 2010)
HSSF	390,6	41,2	89,4	586,9	61,7	89,4				39,4	10,7	71,8	(Stefanakis <i>et al.</i> , 2011)
HSSF	372,5	59,0	83,3	490,5	75,8	84,0	10,1	4,2	60	31,3	19,0	38,5	(Stefanakis <i>et al.</i> , 2011)
VSSF (retsirkulat- sioon)	100	11	89				5,2	5,7	0	45	7	85	(Brix & Arias, 2005)
VSSF	254	19	92				17,2	13,0	25	105	23	78	Brix & Arias, 2005)
VSSF	18,7	1,2	93	101	36	64	2,45	1,6	35	6,4	7,9	0	(Vy maza l, 2008b)
TFCW	193	30	84							37	7	82	(Wu <i>et al.</i> 2011)
TFCW			77,7			77,3			37,9			61,8	(Zhao <i>et al.</i> 2004)

7. Arutelu

Reovee puhastamisel sobiva tehismärgala valimisel tuleb arvesse võtta paljusid erinevaid tegureid. Aga peamised tegurid tehismärgala tüübi ja suuruse valikul on reovee koostis ja kogus, tehismärgala maksumus, opereerimiskulud, tehismärgala asukohta kliima ja pinnas. Kaaluda tuleks kõiki tegureid ning nende põhjal valida puhastussüsteem, mis oleks optimaalseim. Puhastatava vee suure reostuskoormuse puhul tuleks valida tehismärgala süsteem, mis on suurema puhastusefektiivsusega, et vältida tehismärgala ummistumist. Näiteks kui loodete-tüüpi tehismärgala toomis ka suurte BHT väärtuste ($148 \text{ g BHT m}^{-2} \text{ ööp}^{-1}$ kuni $294 \text{ g BHT m}^{-2} \text{ ööp}^{-1}$) juures (Wu *et al.*, 2011), siis avaveeliste tehismärgalasüsteemide projekteerimisel võiks arvestada sellega, et orgaaniline reostuskoormus jääks alla $11,2 \text{ g BHT m}^{-2} \text{ ööp}^{-1}$ (Noorvee *et al.*, 2007).

Arvestades aga tehismärgala kasutusaegseid energia kulusid, siis nii avaveelise tehismärgala kui ka horisontaalse läbivooluga pinnasfiltril puhul neid ei lisandu. Mõlema süsteemi puhul voolab vesi läbi märgala gravitatsiooni toimetel ning mingit kõrvalist aereerimist ei toimu. Juhul kui soovitakse muuta puhastussüsteem tõhusamaks, on võimalik lisada süsteemi aereerimine või siis pumbata märgalast läbi filtreerunud vesi taas tehismärgalasse, et pikendada reovee ja tehismärgala kontakti ning selle läbi saavutada suurem puhastusefektiivsus, mis muudab aga tehismärgala ülevõlpidamise kallimaks. Austin & Nivala (2009) läbi viidud uurimustöös uuriti erinevate B-tüüpi tehismärgalade energiakulusid kindla koguse ja koostisega reovee puhastamisel. Töös selgus, et 6 filtermahutiga loodete-tüüpi tehismärgalale kulub energiat 211 kWh/ööp . Energiat peab kasutama ka vertikaalse läbivooluga ja annus-tüüpi tehismärgalade kasutamisel, kuna reovesi pumbatakse filterkeha pinnale perioodiliselt ning filterkehast välja voolates pumbatakse vajadusel osa veest uuesti filtrile tagasi, et suurendada puhastusefektiivsust.

Samuti tuleb arvesse võtta tehismärgala loomisel, kui suur on hüdrauliline koormus, mis kavatsetakse tehismärgalale juhtida. Seega, on oluline, kui suured reovee kogused kavatsetakse tehismärgalasse suunata. Kuna avaveelisi tehismärgalasid kasutatakse nii sekundaarsel kui ka tertsiaarsel puhastamisel, siis on selle puhul määratud ka erinevad hüdraulilised koormused, sekundaarsel puhastamisel on selleks $12\text{-}47 \text{ mm ööp}^{-1}$, tertsiaarsel puhastamisel $19\text{-}94 \text{ mm ööp}^{-1}$ (Vymazal *et al.*, 2008), horisontaalse läbivooluga pinnasfiltril on hüdrauliline koormus $20\text{-}30 \text{ mm ööp}^{-1}$ ja vertikaalse läbivooluga pinnasfiltril $50\text{-}300 \text{ mm ööp}^{-1}$.

ööp⁻¹ (Noorvee *et al.*, 2007). Labori katsetes läbi viidud loodete-tüüpi tehismärgala hüdrauliline koormus oli 430 mm ööp⁻¹, mille puhul filterkeha ummistumist ei täheldatud (Zhao *et al.*, 2004), kuid kirjanduses on soovitatud hoida hüdrauliline koormus 25-50 mm ööp⁻¹ (Brix, 1994). Annus-tüüpi tehismärgala hüdrauliline koormus oli Ilmatsalus 460-530 mm ööp⁻¹.

Ka kliima mõjutab tehismärgala protsesse päris palju, tehismärgala protsesside optimaalseks toimimiseks peab temperatuur olema õiges vahemikus, kuna vee temperatuur mõjutab mitme bioloogilise protsessi efektiivsust. Eriti tuleb vältida tehismärgala või pinnasfiltri läbi külmumist, kuna see peatab filterkehas toimuvad protsessid. Eriti tundlik on külmumisele avaveeline tehismärgala, kuna märgala on kaetud vaba veega ning puudub soojusisolatsioon. Kuid ka pinnasfiltersüsteemidel ja loodete-tüüpi tehismärgaladel on oht läbi külmuda, kui tehismärgalad asuvad piirkonnas, kus pinnas külmub läbi kuni 1 meetri sügavuselt.

KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureuse töö eesmärk oli anda ülevaade erinevatest tehismärgala süsteemidest ning võrrelda neid loodete-tüüpi tehismärgalaga. Töös oli kirjeldatud avaveelisi, horisontaalse läbivooluga, vertikaalse läbivooluga ja annus-tüüpi tehismärgalasid. Kirjeldati ka loodete-tüüpi tehismärgala süsteemi, selles toimuvaid protsesse, ehitust, energiakulu ning temperatuuri mõju protsessidele. Samuti olid välja toodud peamised füüsilised, keemilised ja bioloogilised protsessid, mis toimuvad tehismärgalades.

Töös välja toodud materjalide põhjal saab väita, et tavapäraste tehismärgala süsteemidega võrreldes on annus- ja loodete-tüüpi tehismärgalade puhastusefektiivsused suuremad, kuid nende süsteemide kasutamine ei ole alati kõige otstarbekam. Need süsteimid tulevad toime suuremate reostuskoormustega ning vajavad reovee puhastamiseks väiksemat pindala, kuid nende opereerimine on võrreldes avaveeliste, vertikaalse läbivooluga ja horisontaalse läbivooluga tehismärgala süsteemidega üpris kallis. Sellest tulenevalt on madalate hüdrauliliste ja orgaanilise koormuste puhul nii materiaalselt kui ka tehniliselt lihtsam ning kasulikum projekteerida tehismärgala, mis ei nõua suuri opereerimiskulutusi.

Samuti on oluline teada ka reovee koostist, et valida sobivaim süsteem reovee töötlemiseks. Näiteks suure lämmastiku ja fosfori sisaldusega reovee puhastamisega tekib avaveelise ja horisontaalse läbivooluga tehismärgalades probleeme, kuna toitainete ärastamine on madal. Lämmastiku ärastamine on tõhusaim annus- ja loode-tüüpi tehismärgalades, kus toimivad tõhusalt nii aeroobsed kui ka anaeroobsed protsessid. Fosfori ärastamine sõltub eelkõige filtermaterjali valikust. Fosfori ärastamiseks peab valima suure fosfori sidumisvõimega filtermaterjali, mis ei küllastuks fosforiga liiga kiiresti.

Loodete-tüüpi tehismärgala on otstarbekas kasutada reovee puhastuses, kui on vaja puhastada suure orgaanilise reostuskoormusega reovett ning oluline on tõhus nitrifikatsiooni ja denitrifikatsiooni toimimine. Samuti on loodete-tüüpi tehismärgala opereerimine keeruline külma kliimaga piirkonnas ning protsessid märgalas peatuvad, kui temperatuur langeb alla 5C°.

Seega ei saa öelda, milline tehismärgala tüüp on parim, kuna kõikide süsteemide puhul on olemas oma positiivsed ja negatiivsed küljed. Tehismärgala süsteemi valimisel peaks arvesse võtma kõiki erinevaid tegureid ning selle põhjal tegema otsuse sõltuvalt reovee koostisest ja tehismärgala asukohast.

TÄNUAVALDUSED

Kõige pealt sooviksin tänada juhendajat Alar Noorveed, kes aitas kaasa bakalaureusetöö valmimisele ja teema valikule. Suur tänu talle toetava ja mõistva suhtumise eest.

Samuti soovin tänada enda lähedasi abi ja innustuse eest.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Austin D., Nivala J., 2009. Energy requirements for nitrification and biological nitrogen removal in engineered wetlands. *Ecological engineering* 35, 184–192.
2. Bothe, H., Ferguson, S.J., Newton W.E., 2007. *Biology of the Nitrogen Cycle*. Elsevier Publishers, Amsterdam, 245-262.
3. Brix H., 1994. Use Of constructed wetland in water pollution control: historical development, present status, and future perspectives. *Water Science Technology* 30(8), 209 –223.
4. Brix H., Arias C. A., 2005. The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines. *Ecological Engineering* 25, 491-500.
5. El-Sheikh, M.A., Saleh, H. I., El-Quosy, D.E., Mahmoud, A.A., 2010. Improving water quality in polluted drains with free water surface constructed wetlands. *Ecological Engineering* 36, 1478-1484.
6. Greenway M., Woolley A., 1999. Constructed wetlands in Queensland: Performance efficiency and nutrient bioaccumulation. *Ecological Engineering* 12, 39–55.
7. Hu, Y., 2012. High rate nutrients removal with alum sludgebased constructed wetlands system: extraordinary approaches with special focus on nitrogen elimination. University College Dublin.
8. Kadlec, R.H., Knight, R.L., 1996. *Treatment Wetlands*. Lewis Publishers, Boca Raton, 893 p.
9. Kadlec, R.H., Reddy, K.R., 2001. Temperature effects in treatment wetlands. *Water Environment Research* Vol. 73 No. 5, 543-557.
10. Kadlec, R.H., 2009. Comparison of free water and horizontal subsurface tretment wetlands. *Ecological Engineering* 35, 159-174.
11. Kadlec, R.H., Roy, S.B., Munson, R.K., Charlton, S., Brownlie, W., 2010. Water quality performance of treatment wetlands in the Imperial Valley, California. *Ecological Engineering* 36, 1093–1107.
12. Karabelnik, K., 2012. Advanced design and management of hybrid constructed wetlands: environmental and water purification effects. Tartu.

13. Kotti I. P., Gikas G. D., Tsihrintzis V. A., 2010. Effect of operational and design parameters on removal efficiency of pilot-scale FWS constructed wetlands and comparison with HSF systems. *Ecological Engineering* 36, 862–875.
14. Kuusik A., 1995. Reovee väikepuhastid Eestis Tallinna Tehnikaülikool Keskkonnatehnika Instituut, Tallinn. 243 p. In Noorvee, A., Mander, Ü., Karabelnik, K., Pöldvere, E. and Maddison, M., 2007. *Kombineeritud pinnasfiltersüsteemide ja tehismärgalapuhastite rajamise juhend*. Tartu Ülikooli Ökoloogia ja Maateaduste Instituut Geograafia osakond, Tartu Ülikool, Tartu.
15. Leverenz, H.L., Haunschild, K., Hopes, G., Tchobanoglous, G., Darby, J.L., 2010. Anoxic treatment wetlands for denitrification. *Ecological Engineering* 36, 1544–1551.
16. Martin, M., N. Oliver, N., Hernandez-Crespo, C., Gargallo, S., Regidor, M.C., 2013. The use of free water surface constructed wetland to treat the eutrophicated waters of lake L'Albufera de Valencia. *Ecological Engineering* 50, 52– 61.
17. Noorvee, A., Mander, Ü., Karabelnik, K., Pöldvere, E. and Maddison, M., 2007. *Kombineeritud pinnasfiltersüsteemide ja tehismärgalapuhastite rajamise juhend*. Tartu Ülikooli Ökoloogia ja Maateaduste Instituut Geograafia osakond, Tartu Ülikool, Tartu.
18. Prost-Boucle S., Molle P., 2012. Recirculation on a single stage of vertical flow constructed wetland: Treatment limits and operation modes. *Ecological Engineering* 43, 81– 84.
19. Stefanakis A. I., Akratos C. S., Tsihrintzis V. A., 2011. Effect of wastewater step-feeding on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering* 37, 431–443
20. Sun, G., Zhao, Y., Allen, S., 2005. Enhanced removal of organic matter and ammoniacal-nitrogen in a column experiment of tidal flow constructed wetland system. *Journal of Biotechnology* 115, 189–197.
21. Zhao Y.Q., Sun G., Allen S.J., 2004. Purification capacity of a highly loaded laboratory scale tidal flow reed bed system with effluent recirculation. *Science of the Total Environment* 330, 1–8.
22. Vohla, C., Kõiv, M., Bavor, H.J., Chazarenc, F., Mander, Ü., 2011. Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands-A review. *Ecological Engineering* 37, 70–89.
23. Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P. F., Green, M. B. & Haberl, R., 1998. *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe*. Backhuys Publishers: Leiden.

24. Vymazal, J., 2001. Types of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Their Potential for Nutrient Removal. In Transformations of Nutrients in Natural and Constructed Wetlands; Vymazal, J., Ed.; Backhuys Publishers: Leiden, The Netherlands, 1-93.
25. Vymazal J., 2002. The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. *Ecological Engineering* 18, 633–646.
26. Vymazal, J., 2005. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering* 25, 478–490.
27. Vymazal, J., 2007. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment* 380, 48–65.
28. Vymazal, J., 2008a. Constructed Wetlands, Surface Flow. *Encyclopedia of Ecology*, Elsevier B.V. publishing, T řeboň, Czech Republic, 765-775.
29. Vymazal, J., 2008b. Constructed wetlands, subsurface flow. *Encyclopedia of Ecology*, Elsevier B.V. publishing, T řeboň, Czech Republic, 748-764.
30. Vymazal J., 2009. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological Engineering* 35, 1–17.
31. Vymazal J., 2010. Water and Nutrient Management in Natural and Constructed Wetlands. Springer Science, Business Media B.V. 375 p.
32. Vymazal J., 2011. Constructed Wetlands in the Czech Republic: 20 Years of Experience. In: Vymazal J. Water and Nutrient Management in Natural and Constructed Wetlands. Springer Netherlands Publishers, 169-178.
33. Wallace, S.D., Parkin, G.F., Cross, C.S., 2001. Cold climate wetlands: design and performance. *Water Science Technology* 44, 259–266.
34. Wu, S., Zhang, D., Austin, D., Dong, R., Pang, C., 2011. Evaluation of a lab-scale tidal flow constructed wetland performance: Oxygen transfer capacity, organic matter and ammonium removal. *Ecological Engineering* 37, 1789– 1795.

Tidal flow constructed wetland performance comparison with other constructed wetland systems

Kadri Väär

SUMMARY

There is growing interest in finding more ecological and environmentally friendly technologies to treat waste water. That is why the use of constructed wetlands has increased over last few decades. Compared to conventional waste water treatment systems, constructed wetland systems are relatively inexpensive technologies. Constructed wetland systems allow us to treat waste water with low energy and maintenance costs. These systems are mostly used for municipal wastewater, industrial wastewater and gray water.

Although constructed wetland systems are more ecological and environmentally friendly technologies, the purification efficiency (especially of nutrients) is still low. This is why it is important to develop techniques that increase aeration capacity in the constructed wetland bed. For example, technologies to improve aeration capacity are: vertical flow constructed wetlands, using waste water recirculation, systems with fluctuating water levels, batch flow and tidal flow constructed wetland systems. There are three main types of constructed wetland systems: free water surface constructed wetlands, horizontal subsurface constructed wetlands and vertical subsurface constructed wetlands.

In this thesis tidal flow constructed wetlands (TFCW) are compared to other wetland systems: free water surface constructed wetlands, horizontal subsurface constructed wetlands, vertical subsurface constructed wetlands and batch flow constructed wetlands. The main objective of this thesis is to describe TFCW, find the strengths and weaknesses of this constructed wetland type and compare TFCW to other constructed wetlands.

From literature emerged that TFCW are in fact more efficient in treating waste water, than other types of constructed wetlands. It was revealed that the aeration capacity of TFCW is up to $473 \text{ gO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ while the aeration capacity of other systems stayed in the range of $1\text{-}30 \text{ gO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Also the area required for the TFCW is smaller compared to other systems. The

minimal area per population equivalent was $0,3 \text{ m}^2$ while for other systems it was required minimal $0,6 \text{ m}^2 \text{ PE}^{-1}$.

Although the purification efficiencies for TFCW and batch flow constructed wetlands are higher, also their operational costs are higher, which means that they aren't always the best solution for wastewater treatment. If the waste water doesn't contain high concentrations of nitrogen and phosphorus and has low organic contamination rate, it is not reasonable to use TFCW or batch flow constructed wetland because of their high operational costs.

To choose the best system for waste water treatment, it is necessary to take into account all different parameters of constructed wetlands and make the decision based on the waste water parameters and the local conditions.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kadri Väär,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Loodete-tüüpi tehismärgalade tõhususe võrdlus tavapäraste tehismärgaladega, mille juhendaja on Alar Noorvee,
 - 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **27.05.2014**